

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.211335

基于直接时间反转法的直流配电网故障测距

杨欢红¹, 朱子叶¹, 黄文焘², 余威¹, 周思怡¹

(1. 上海电力大学, 上海 200090; 2. 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室(上海交通大学), 上海 200240)

摘要: 针对直流配电网电能分布不均匀造成定位偏差的问题, 着眼电流突变量的频段分布特性, 利用直接时间反转法将距离问题转化为点源位置响应。同时利用离散二进小波的平移不变性, 将行波信号高频分量模极大值以脉冲激励形式重构时间反转故障暂态行波信号, 对应刻画其尖锐变化点, 突出能量分布特征, 不受故障信息量少的限制, 从理论角度证明了该方法在主馈线和 T 接线路的适用性。通过在 PSCAD/EMTDC 中搭建 ± 15 kV 两端中压柔性直流配电网模型, 对于不同过渡电阻和不同故障类型进行故障仿真和数据采集验证。结果表明, 所提方法在 5 ms 短时窗内实现测距, 抗过渡电阻能力强, 能够反应不同工况下故障线路电磁能量的变化。

关键词: 两端柔性直流配电网; 直接时间反转; 信号重构; T 接线路; 故障测距

Fault location of a DC distribution network based on a direct time reversal method

YANG Huanhong¹, ZHU Ziye¹, HUANG Wentao², YU Wei¹, ZHOU Siyi¹

(1. Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2. Key Laboratory of Power Transmission and Transformation Control, Ministry of Education, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: There is a problem of deviation in fault location caused by uneven distribution of electrical energy in a DC distribution network. Focusing on the frequency band distribution characteristics of current mutation, a direct time reversal method is used to transform the distance problem into the response of the point current source field, and the translation invariance of a discrete dyadic wavelet is used at the same time. The time reversal fault transient traveling wave signal is reconstructed by the modulus maxima of the high-frequency component of the traveling wave signal in the form of pulse excitation. Its sharp change points are characterized accordingly, highlighting the characteristics of energy distribution. This is not limited by having little malfunction data. The applicability of the method in the main feeder and T-line is proved theoretically. The ± 15 kV topology of a point-to-point MVDC distribution network model is built in PSCAD/EMTDC, and fault simulation and data acquisition verification are carried out considering the change of transition resistance and the influence of different fault types. The results show that the proposed method can realize the location in a short time window of 5 ms, and it has good anti transition resistance ability, which can reflect the change of electromagnetic energy of fault lines in different working conditions.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51877135).

Key words: topology of point-to-point MVDC distribution network; direct time reversal; signal reconstruction; T-line; fault location

0 引言

随着不同类型负荷并网需求的飞速增长, 以及新能源发电在传统配电网的渗透率不断提高^[1-3], 直流配电网因兼具变流环节少、运行方式灵活等优点, 能够实现多种能源类型优化互补, 将成为未来能源

互联网的重要支撑环节。受直流侧电容和换流站控制策略的影响, 直流配电网故障暂态阶段特征复杂, 线性等值分析困难, 故障电流上升速度快; 同时, 直流配电网保护速动性和灵敏性较高, 可供故障分析的有效信息少, 为直流配电网的故障测距带来巨大挑战^[4-6]。因此, 如何改进和完善故障测距技术是直流配电网发展中亟待解决的课题之一。

直流配电网馈线长度短且系统架构更为复杂,

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51877135)

目前的技术研究多集中在直流输电网和传统交流配电网方面, 不完全适用于直流配电线路。现有的测距方式有行波法^[7-11]、注入法^[12-13]和解析法^[14-18]等。行波法利用故障产生的高频电磁波及传播特征进行定位, 然而对于短距离的直流配电线路存在波头检测困难的缺点; 此外, 若利用故障行波固有频率与故障距离的关系, 则对时间窗的选取要求较高, 但直流配电线路故障初期信号固有主频率低, 可利用数据窗短, 导致测频算法精度大幅降低。注入法通过向已隔离的故障线路设置故障测距模块, 构建振荡回路, 提取检测特定频率信号计算故障距离, 需要额外增加一次设备, 经济性较差。解析法基于时频信息, 结合系统参数建立故障测距公式, 从而达到测距目的, 该方法易受换流器控制策略的影响。上述方法可能增加直流配电系统的复杂性, 对于故障数据利用率较低, 且难以满足直流配电网电气距离较短时的测距准确性。

在电力系统故障测距领域中, 电磁时间反转法(Electromagnetic Time Reversal, EMTR)表现出更强的鲁棒性^[19-22]。文献[19-20]基于电磁时间反转理论, 建立系统传递函数, 推导出频率与故障距离的关系, 实现在高压直流输电线路的故障测距, 满足抗过渡电阻的要求, 且无需增加一次设备; 文献[22]提出基于遗传优化算法的FasTR方法, 获取了时间反转信号在空间和时间上的最大相关性峰值, 实现了数据的实时处理和故障定位, 但该方法需要大量故障仿真数据进行训练, 误差受样本大小影响, 且移植性不高。同时文献[22]也指出电流突变量在交流配电网等复杂网络中分布不均匀, 会造成时间反转过程中传递函数的建立发生偏差。上述文献方法存在对模型要求严格及算法参数设置困难等问题, 且并未考虑直流配电网特殊的故障特性, 导致其适用范围较小, 缺乏扩展性, 降低了电磁时间反转法在复杂直流配电网中故障测距求解的优势。

基于此, 针对高低频分量在复杂网络分布的差异, 提出了基于直接时间反转法的测距方法。通过对柔性直流配电网故障初期的暂态分析, 提取电流暂态量的特征频段; 通过将测距问题转化为时间反转中电磁场点源位置响应, 实现短时窗内故障点定位; 通过脉冲函数对行波高频分量信号重构, 放大处理电流暂态信号, 充分利用线路故障有效信息。从理论角度证明了该方法在主馈线和T接线路的可行性, 通过算例验证该方法的有效性。

1 直流配电网故障分析

考虑适用性和经济性, 本文以两电平电压源换

流器(Voltage Source Converter, VSC)控制的中压直流配电网为研究对象。柔性直流配电网的故障暂态电流会影响故障测距的准确性, 故此本节主要明晰电流突变量在复杂直流配电网的频段分布差异。

图1为极间短路故障等效电路图, 其中: x 为故障距离; R 和 L 分别为线路单位长度的电阻和电感; C 为直流侧并联电容器。依据极间短路故障的故障过程, 分析直流线路故障过程初始阶段。故障之初, 极间电压大于交流侧任一电压, 二极管反向截止, 直流侧电容器与极间故障点形成电流通路, 此时故障短路电流以电容放电电流为主导, 电容电压逐渐降低。放电过程通常可由二阶欠阻尼振荡表示。振荡环节的传递函数为

$$G(s) = \frac{1}{(s/\omega_n)^2 + 2\zeta(s/\omega_n) + 1} \quad (1)$$

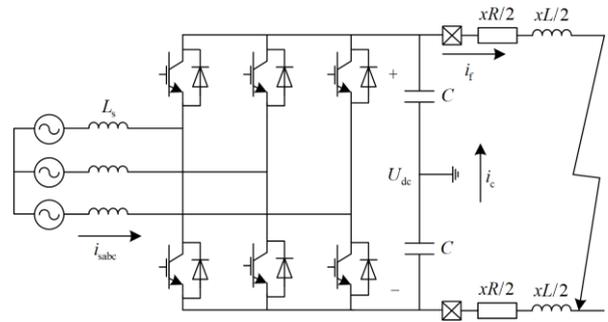


图1 极间短路故障等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit of pole-to-pole fault

谐振角频率可由自然振荡角频率表示, 如式(2)所示。

$$\omega_r = \omega_n \sqrt{1 - 2\zeta^2} \quad (2)$$

根据线路的分布式参数, 可将振荡环节的传递函数表示为标准型。

$$G(s) = \frac{1}{(s/2/x^2CL)^2 + 2(xR\sqrt{C/8L})(s/\sqrt{2/x^2CL}) + 1} \quad (3)$$

其中:

$$\begin{cases} \omega_n = \sqrt{\frac{2}{x^2CL}} \\ \zeta = \frac{xR}{2} \sqrt{\frac{C}{2L}} \end{cases} \quad (4)$$

因此, 谐振频率为

$$f_r = \frac{\omega_r}{2\pi} = \frac{\sqrt{(1/x^2LC) - (R/2L)^2}}{2\pi} \quad (5)$$

图2为单极接地故障时的等效电路图, 故障极电容器与接地故障点构成RLC放电回路, 放电回路

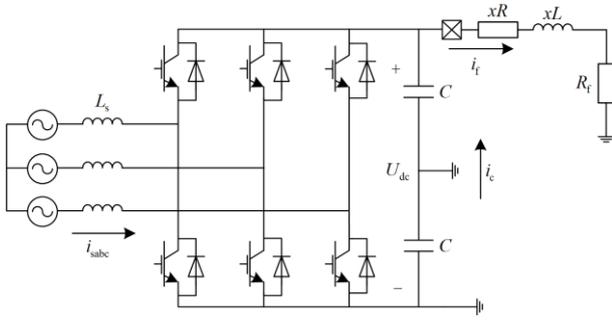


图2 单极接地故障等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of single-pole grounding fault

的阻比决定故障电流的暂态特征。单极接地故障通常满足临界条件 $R + R_f < 2\sqrt{L/C}$ ，电容的放电过程为二阶欠阻尼振荡，动态过程与极间短路故障基本一致。

对于典型系统仿真参数^[23]，同一长度线路在低频段 $G(s)$ 的幅频特性由 0 逐步增大至 f_r ，从而达到谐振峰值，这一频段线路对电流突变量衰减效果最小；而对于谐振频率大于 f_r 的高频段，幅频特性由谐振峰值快速衰减，线路对电流突变量衰减作用增强，存在时间变短；当线路长度达到 20 km 时， f_r 达到 6000 Hz 左右。此外，对于故障距离小于 0.5 km 的极间短路故障，电流的振荡频率最大约为 875 Hz；同时考虑到分布式电源的间歇性和直流配电网的线路长度，选取 500~4000 Hz 作为故障测距的特征频段。

2 故障测距理论

2.1 基于直接时间反转法的双端故障测距

直接时间反转法利用脉冲信号在原始源位置出现信号峰值的特点，重构出源的幅度和位置信息^[24]。根据电路理论，对于任意输入函数，网络脉冲响应的积分可决定网络响应。在空间分布讨论中，格林函数作为一维标量波动方程的解，与时域问题里脉冲响应函数有相同作用。故障暂态行波遵循波过程的规则和原理，其初始行波的影响因素仅有故障源和线路参数，线路的边界取决于直流电抗器和滤波电路，并参与行波的折反射过程。

以单极接地故障为例，图 3 为直流配电网直流侧主馈线发生故障，考虑单根线路的总长为 l ，线路故障发生在 $x = x_f$ 处，流向线路 M、N 端的故障电流分别表示为 I_{F1} 和 I_{F2} ，故障发生时刻，仅存在电流故障暂态前行波，因此 $I_{F1} = I_{F2} = I_F$ 。直接时间反转可以从时域进行分析，为了计算的简便性，下文在频域上从信号的角度进行讨论。

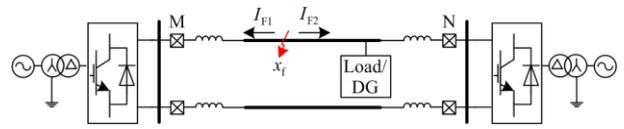


图3 含VSC换流器直流侧故障

Fig. 3 DC side fault with VSC

1) 对故障点产生的电流故障暂态行波信号序列 I_F 进行离散化处理，如式(6)所示。则电流故障暂态行波信号经过线路传播，到达位于 M 端的测量点，接收并记录的信号如式(7)所示。

$$S_F(\omega) = I_F(\omega) = a\delta(\omega) \quad (6)$$

$$S_0(\omega) = G(x_0, x_f, \omega)S_F(\omega) \quad (7)$$

式中： S_F 为离散化后的电流故障暂态行波信号； a 为离散化后的信号强度； $\delta(\omega)$ 为脉冲函数的傅里叶形式； $G(\cdot)$ 为格林函数。

同理可以得出位于 N 端测量点处有

$$S_l(\omega) = G(x_l, x_f, \omega)S_F(\omega) \quad (8)$$

2) 在时间反转的过程中，将 $S_0(\omega)$ 沿时间轴取反，即在频域上取共轭。由于时间反转需要选取一定时长 T 实现，故在频域上附加相位 $e^{-j\omega T}$ ；于是 $S_0^*(\omega) = G^*(x_0, x_f, \omega)S_F^*(\omega)$ 被作为新的激励重新传回系统，此时由新激励源产生的响应为

$$G_{TR}(x, x_f, \omega) = \int_S \left[\begin{array}{l} G(x, x', \omega)\nabla G^*(x', x_f, \omega) - \\ G^*(x, x_f, \omega)\nabla G(x, x', \omega) \end{array} \right] \cdot ndS' \cdot e^{-j\omega T} = \\ \left[G^*(x, x_f, \omega) - G(x, x_f, \omega) \right] \cdot e^{-j\omega T} \quad (9)$$

代入自由空间格林函数，得到

$$G_{TR}(x, x_f, \omega) = -\frac{j}{2k} (e^{-jk|x-x_f|} + e^{jk|x-x_f|}) \cdot e^{-j\omega T} = \\ -\frac{j}{2k} \cos|x-x_f| \cdot e^{-j\omega T} \quad (10)$$

对式(10)进行 IFT 变换，得到

$$g_{TR}(x, x_f, t) = -\frac{j}{4\pi \cdot k} \cos|x-x_f| \delta(t-T) \quad (11)$$

式(11)表示反转结果以位置 $x = x_f$ 为中心出现收敛产生空间聚焦，以 $t = T$ 时刻为中心出现收敛发生时间聚焦，实际情况中 $G_{TR}(x, x_f)$ 与边界有关。

3) 线路设置假设故障点 $x = \{x_1, L, x_s, L, x_m\}$ ，基于式(7)，假设故障点 x_s 位置处接收到时间反转信号，如式(12)所示。

$$S_{TR}(\omega) = G_{TR}(x_s, x_0, \omega)G^*(x_f, x_0, \omega)S_F^*(\omega) + \\ G_{TR}(x_s, x_l, \omega)G^*(x_f, x_l, \omega)S_F^*(\omega) \quad (12)$$

收到的信号能量存在如式(13)所示的关系。

$$\Gamma(\omega) = \sum_{i=0,l} |G_{TR}(x_s, x_i, \omega) G^*(x_f, x_i, \omega) S_F^*(\omega)|^2 \quad (13)$$

4) 当式(13)中 x_s 与 x_f 重合取等号时, 该点即为故障点的真实位置。对式(13)做简要说明, 并引入施瓦兹不等式, 即可得到

$$\left(\sum_{i=0,l} G_{TR}(x_s, x_i, \omega) G^*(x_f, x_i, \omega) \right)^2 \leq \left(\sum G^2(x_f, x_0, \omega) \right) \left(\sum G^2(x_s, x_0, \omega) \right) \quad (14)$$

因此, 当 $x_s = x_f$ 时, 式(14)取最大值。由此可以发现, 在源点位置得到的数值主要由源点的强度决定, 而其他位置远小于该处能量值, 其原因是式中自相关项远大于互相关项之和。

考虑到最终采样处理结果为故障暂态行波在某一频带的序列, 对于一维标量波动方程的解 $G(x, x_f, \omega)$, 对任意频率 f 存在传播常数 h :

$$\int \left[\frac{d^2 G(x, x_f, \omega)}{dx^2} + k^2 G(x, x_f, \omega) \right] e^{-jkx} dx = (k^2 - h^2) \int G(x, x_f, \omega) e^{-jh x} dx = -e^{-jh x_f} \quad (15)$$

$$\delta(x - x_f) = \frac{1}{2\pi} \int e^{jh(x-x_f)} dh \quad (16)$$

因此

$$G(x, x_f, \omega) = \frac{1}{2\pi} \int \frac{e^{jh(x-x_f)}}{h^2 - k^2} dx \quad (17)$$

若令 k 为复数, 且 $\text{Im}(k) > 0$, 图 4(a)表示了此时被积函数的极点位置, 当 $x - x_f \geq 0$ 时, 积分路径沿实轴通过复平面上半平面闭合而不会改变其值, 当 $x - x_f \leq 0$ 时, 则通过下半平面闭合。

如图 4(b)所示, 对于 k 是实数, 则使积分路径在极点处有一刻齿。故信号频带的选取不会影响其数值。

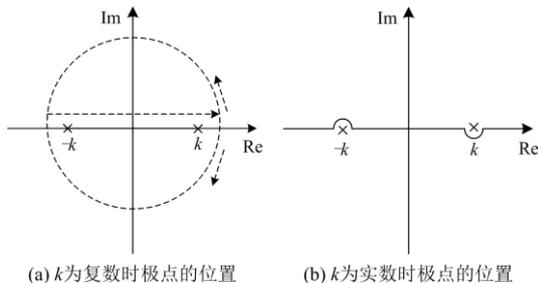


图 4 极点的位置表示

Fig. 4 Representation of pole position

2.2 T 接线路故障测距

如图 5 所示, 当 T 接线路上发生单极接地故障时, 故障点在 T 接线路 $x = x_f$ 、 $y = y_f$ 位置处, 此

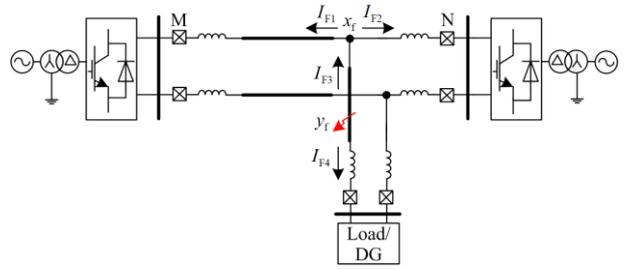


图 5 T 接线路故障

Fig. 5 T line grounding fault

时根据 2.1 节分析, 假设故障点 x_s 位置处接收到时间信号, 如式(18)所示。

$$S_{TR}(\omega) = G_{TR}(x_s, x_0, \omega) G^*(x_f, x_0, \omega) G^*(y_f, x_f, \omega) S_F^*(\omega) + G_{TR}(x_s, x_f, \omega) G^*(x_f, x_f, \omega) G^*(y_f, x_f, \omega) S_F^*(\omega) \quad (18)$$

则接收到的信号能量存在式(19)的关系。

$$\Gamma(x_s, \omega) = \sum_{i=0,l} |G_{TR}(x_s, x_i, \omega) G^*(x_f, x_i, \omega) G^*(y_f, x_f, \omega) S_F^*(\omega)|^2 \quad (19)$$

根据赫尔德不等式的推广, 当 $x_s = x_f$ 时取得最大值。由上述分析可知, 此时仅能够判断故障发生在分支节点处, 对于支路故障需要借助分支线路的辅助定位点界定故障范围计算故障距离, 即测距流程是先确定故障分支再进行分支测距。

3 算法与测距方案

3.1 小波变换模极大值重构原信号

由于直流配电网线路故障暂态行波谐波含量丰富, 振荡衰减明显, 可利用的有效数据窗短, 针对故障后短时间内暂态信号的奇异性特征, 利用脉冲函数对故障暂态行波进行信号重构。小波分析在时频域上具备优越的局部化性质, 可对直流配电网电流突变量不同频段成分进行有效的信号分析^[25-27]。

离散二进小波(Discrete Dyadic Wavelet Transform, DDWT)作为信号的超完备表达, 仅对尺度参数进行离散, 由于其平移不变性, 相应的小波模极大值可有效描述行波信号局部的陡峭程度, 刻画信号奇异性, 对原始信号重构并压缩原始信号数据序列。利用脉冲函数表示每一处电流故障暂态行波信号的小波变换模极大值。脉冲函数的脉冲强度与小波变换系数的模极大值相等, 将脉冲函数构成的脉冲函数序列作为等效故障暂态行波信号。此外, 故障暂态行波信号的突变性表现为正的李氏指数, 其小波变换模极大值随分解尺度增大而增大或不变。而噪声

的突变性表现为负的李氏指数，其小波变换模极大值随分解尺度增大而减小。根据这一特性可有效识别噪声干扰。

对于信号 S ，二进小波变换的分解展开式为

$$\begin{cases} A_{2^j} S(n) = \sum_{k_z \in Z} h_{k_z} A_{2^{j-1}} S(n - 2^{j-1} k_z) \\ W_{2^j} S(n) = \sum_{k_z \in Z} g_{k_z} W_{2^{j-1}} S(n - 2^{j-1} k_z) \end{cases} \quad (20)$$

式中： $A_{2^j} S(n)$ 为信号在第 j 层的低频部分(近似部分)的小波系数； $W_{2^j} S(n)$ 为信号在第 j 层的高频部分(细节部分)的小波系数； h_{k_z} 与 g_{k_z} 分别为小波系数序列； n 为采样序号； j 为小波变换尺度。其中高频分量包含奇异信息，滤除信号低频分量，选取高频分量求取模极大值。

当 $|n - n_0| < \varepsilon$ 时， ε 为任意正数，对任意的 $n \neq n_0$ ，满足

$$|W_{2^j} S(n_0)| \geq |W_{2^j} S(n)| \quad (21)$$

式中， $W_{2^j} S(n_0)$ 为信号 S 在 n_0 处的模极大值。

3.2 测距步骤

图 6 描述了信号重构的直接电磁时间反转故障测距流程，具体步骤如下所述。

步骤 1：通过故障录波装置在检测点以预定采样频率对线路两端的故障行波暂态量进行采样和存数。对于存在电磁耦合关系的正、负极暂态量进行解耦处理，求取 1 模分量。

步骤 2：利用离散二进小波对步骤 1 提取的行波 1 模分量进行小波变换分解，利用式(20)、式(21)通过小波变换模极大值获取原始信号的突变点位置，将模极大值用脉冲函数表示重构，并作为故障暂态行波信号序列。

$$S_F(n) = a_n \delta(n) \quad n = 0, 1, L, N-1 \quad (22)$$

式中， n 为采样序号，录波装置时间窗长度依据保护动作时间确定。

步骤 3：根据式(6)一式(8)将接收到的等效故障暂态行波信号 S_0 在时间窗 T 内进行时间反转操作。

$$S_0^r(n) = S_0(N-1-n) \quad (23)$$

将等效时间反转信号重新传回系统。如前文所述，为使时间反转的自变量在信号的持续时间内为正，除了时间反转之外，需要添加一段时间延迟，该时延等于采样时间窗 T 。

步骤 4：对于故障线路设置 m 个假设故障点，沿故障线路计算 m 个假设故障点的能量值。基于式(13)，能量值由线路两端时间反转后的信号传回故障处得到。

步骤 5：求解出最大能量值对应的点，该点即为真实故障点的位置。

$$x_{f_real} = \arg \left|_{x_s} \max \|\Gamma(x_s, \omega)\| \right. \quad (24)$$

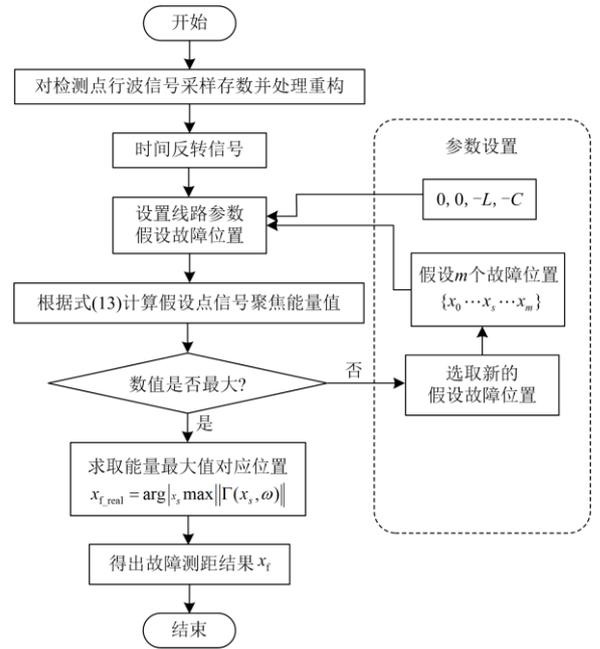


图 6 测距流程

Fig. 6 Flow diagram of fault location

4 仿真分析

4.1 仿真模型

在 PSCAD/EMTDC 中搭建仿真模型。图 7 为双端结构直流配电网，负荷转移建立在另一端具有充足供电余量的基础上，表 1 给出了相关系统参数。其中，两端采用两电平 VSC 并空间矢量脉宽调制控制技术；直流侧单极对称接线，电容中性点直接接地，降低直流线路的对地绝缘；考虑架空线路温度会随着电流增加而升高，线路中阻抗会相应提高，降低直流负荷距^[28]，故线路采用电缆相域模型，电气参数如表 2 所示，出线处配置直流断路器，保障线路或母线故障时能够快速切除；同时，换流设备控制系统的响应延时单位为 ms，由于直流配电网线路较短，各支路终端故障录波装置检测到初始行波的时间单位为 μs ，此时故障行波仅受线路分布参数和直流配电网拓扑结构影响，不受换流器控制系统和故障点背侧系统的制约。

设置线路 L2 发生单极接地故障，故障发生时刻为 2.5 s，直流电网保护动作要求线路故障后 5 ms 内完成，时间窗取 5 ms，记录 2.498~2.503 s 的数据，每隔 0.015 km 设置一个假设故障点，叠加高斯白噪声模拟采样在实际运行中受到的电磁干扰影响。

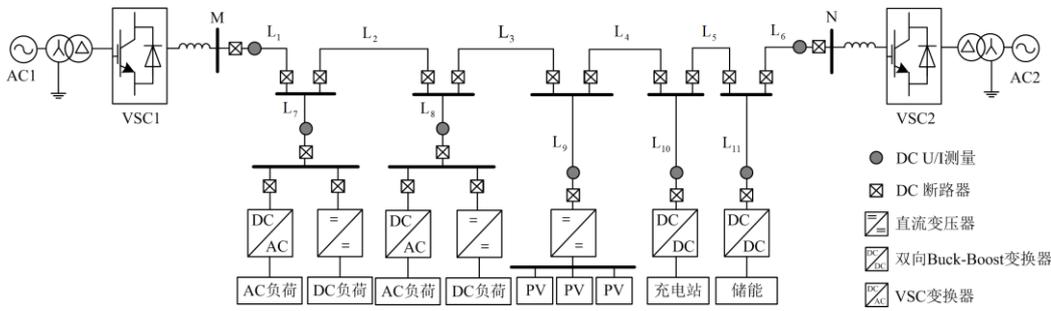


图7 两端柔性中压直流配电网

Fig. 7 Topology of point-to-point MVDC distribution network

表1 直流配电网仿真模型参数

Table 1 Simulation model parameters of DC network distribution network

参数	数值	参数	数值
直流电压/kV	±15	AC load/MW	1
额定容量/MVA	15	DC load/MW	0.16
光伏出力/MW	1.5	储能装置/MW	-2~2
充电站/MW	-0.5~-1	线路长度/km	5

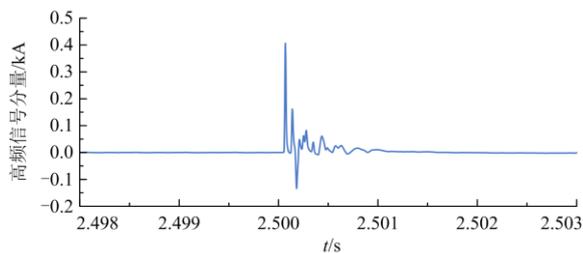
表2 电缆电气参数

Table 2 Electrical properties for cable

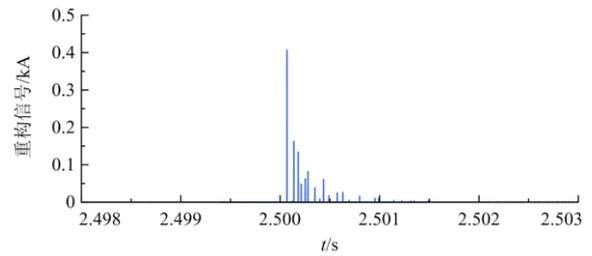
电缆层级	电阻率	相对介电常数
内层导体	2.82×10^{-8}	4.1
内层绝缘	—	4.1
外层导体	1.86×10^{-8}	2.3
外层绝缘	—	2.3

注: 相对磁导率均为1。

直流配电网中, 换流设备的开关频率多为 2 kHz, 因此, 其开关关断产生的谐波也多为 2 kHz。选取合适的小波系数, 在一定程度上能够躲避换流设备谐波对测距的干扰。对线路检测点采样存数的电流故障暂态行波进行时间反转处理和重构, 选取 B 样条小波滤除偶数次谐波, 剔除李氏指数小于 0 的模极大值, 避免噪声干扰。对图 8(a)中的暂态量根据图 8(b)求取高频分量小波变换的模极大值重构信号, 脉冲函数序列作为等效故障暂态行波信号。图 9 为等效故障暂态行波信号进行时间反转过程。



(a) 离散二进小波分解后的 i_{M1} 高频分量



(b) 重构信号

图8 脉冲函数重构信号

Fig. 8 Signal reconstruction by pulse excitation

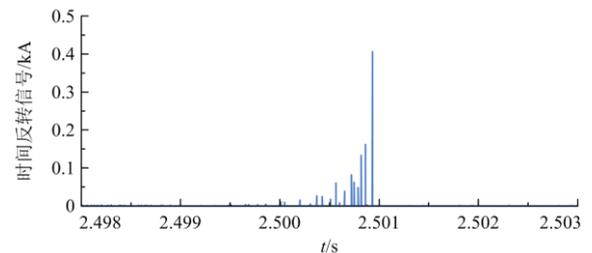


图9 时间反转过程

Fig. 9 Time reversal process of the signal

4.2 不同过渡电阻

由于过渡电阻在实际运行中存在不确定性, 本小节对不同数值过渡电阻进行故障仿真。设置线路 L2 发生单极接地故障, 故障点设置在线路 L2 的 5 km 位置处, 即与 VSC1 的检测点 M 的距离为 10 km, 过渡电阻分别选取 0.01 Ω、50 Ω、100 Ω。

对数据进行归一化处理, 图 10 显示了不同的过渡电阻对故障点处能量聚焦的差别。观察比较可以看出, 由于离散二进小波提取的高频分量包含初始电流故障行波, 以及行波在线路中传播遇到波阻抗不连续点而产生的反射波, 图像出现多个尖峰; 但反射波的幅值小于初始电流故障行波, 所以仅出现一个最大值点。

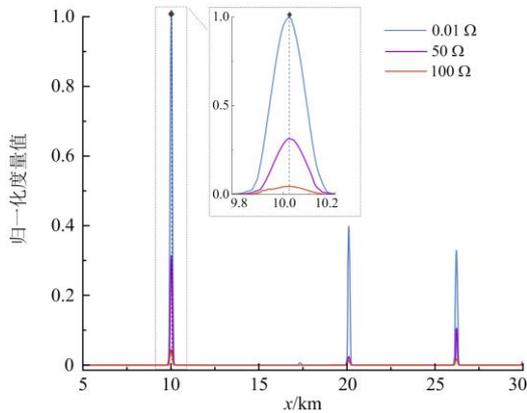


图 10 不同过渡电阻下的测距结果

Fig. 10 Fault location results under different transition resistance

故障过电流的振荡幅度和变化速度与过渡电阻的数值大小有关，随过渡电阻数值的增大，电流暂态量最大幅值减小，反之幅值增加。线路 L3 上出现最大值的位置基本相同，均在距离 M 点 10.02 km 位置处，误差百分率小于 1%。过渡电阻的变化对同一位置处时间反转故障测距结果基本没有影响。因此，在考虑过渡电阻数值变化的情况下，始终能够保证准确可靠的测距结果。

4.3 不同故障类型

对于双端结构直流配电网设置不同故障类型进行仿真验证。设置线路 L4 发生不同类型故障，故障点与 VSC1 的检测点 M 距离为 17 km，过渡电阻为 0.01 Ω。

图 11 显示了在同一位置不同故障类型时的测距结果。观察比较可以看出，极间短路故障的尖峰大于单极接地故障，这是由于单极接地故障发生以后，故障极的电容迅速放电致使故障电流短时间内上升到一个较高数值，此时交流侧通过反并联二极管对直流侧馈流，故障点仅受到交流侧电抗器的续流电流；而当极间短路故障发生时，对于 VSC，即使

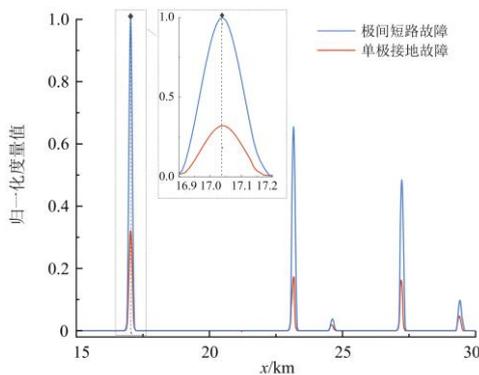


图 11 不同故障类型测距结果

Fig. 11 Fault location results with different fault types

在 IGBT 闭锁后，交直流侧仍会同时向故障点短路电流提供电源，二极管急剧过流。结果显示，线路 L4 发生单极接地和极间短路时，最大值均出现在距离 M 点 17.06 km 处，故不同故障类型对同一位置处测距结果基本无影响。

4.4 采样频率的选择

设置采样频率变化范围为 250~1000 kHz，故障范围设置在主馈线上。图 12 给出了误差随故障距离和采样频率的变化示意图，随采样频率的增大，对于故障信号突变的获取越精确，测距误差减小；当故障发生在距离换流器较近位置时，误差增大。

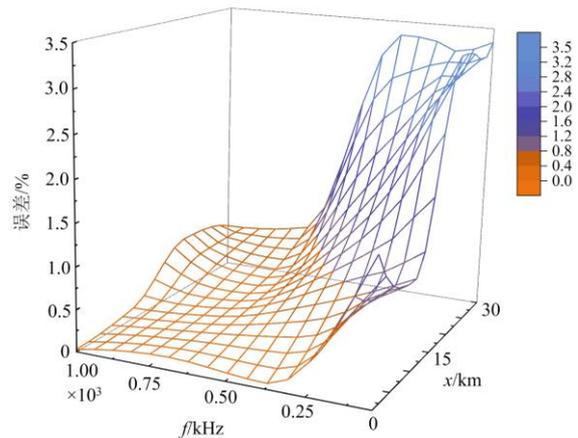


图 12 误差随故障距离和采样频率的变化

Fig. 12 Variations of error along with fault distance and sampling frequency

4.5 不同故障距离

在每条线路的不同位置设置故障，过渡电阻恒定不变，表 3 和表 4 给出了不同类型故障的测距结果误差。此外，单极接地故障时能量随故障距离和

表 3 单极接地不同故障距离下故障测距结果
Table 3 Fault location results for single-pole grounding fault with different fault distance

故障 线路	1.8 km		2.6 km		4.3 km	
	测距结 果/km	相对误 差/%	测距结 果/km	相对误 差/%	测距结 果/km	相对误 差/%
L1	1.815	0.833	2.625	0.962	4.335	0.814
L2	1.770	1.667	2.610	0.385	4.290	0.233
L3	1.845	2.500	2.625	0.962	4.260	0.930
L4	1.830	1.667	2.595	0.192	4.350	1.163
L5	1.815	0.833	2.610	0.385	4.245	1.279
L6	1.785	0.833	2.595	0.192	4.245	1.279
L7	1.845	2.500	2.655	2.115	4.320	0.465
L8	1.785	0.833	2.610	0.385	4.215	1.977
L9	1.755	2.500	2.625	0.962	4.335	0.814
L10	1.740	3.333	2.535	2.500	4.350	1.163
L11	1.800	0.000	2.670	2.692	4.275	0.581

过渡电阻的变化如图 13 所示, 在线路两端处, 即故障发生在母线近端处能量数值大于线路中部故障。初始行波高频波头在到达直流侧出口处直流电抗器时反射系数接近于 1, 电抗器数值越大, 反射波的幅值变化越慢, 零时刻发生正的全反射, 在能量上反应为靠近线路端口处能量收敛较大。

表 4 极间短路不同故障距离下故障测距结果
Table 4 Fault location results for pole-to-pole fault with different fault distance

故障 线路	1.8 km		2.6 km		4.3 km	
	测距结 果/km	相对误 差/%	测距结 果/km	相对误 差/%	测距结 果/km	相对误 差/%
L1	1.815	0.833	2.625	0.962	4.335	0.814
L2	1.770	1.667	2.610	0.385	4.290	0.233
L3	1.845	2.500	2.625	0.962	4.260	0.930
L4	1.830	1.667	2.595	0.192	4.350	1.163
L5	1.815	0.833	2.610	0.385	4.245	1.279
L6	1.785	0.833	2.595	0.192	4.245	1.279
L7	1.845	2.500	2.655	2.115	4.320	0.465
L8	1.785	0.833	2.610	0.385	4.215	1.977
L9	1.755	2.500	2.625	0.962	4.335	0.814
L10	1.740	3.333	2.535	2.500	4.350	1.163
L11	1.800	0.000	2.670	2.692	4.275	0.581

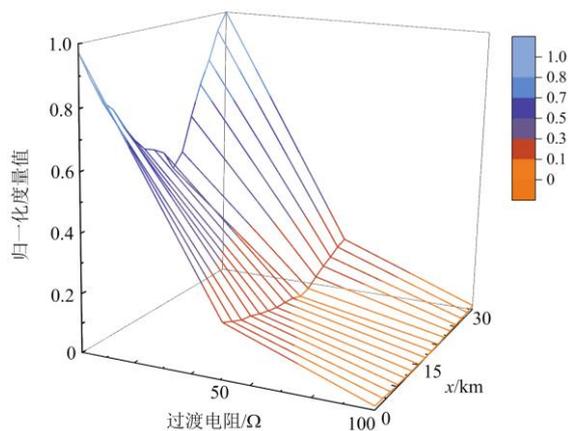


图 13 不同故障距离的数值变化

Fig. 13 Numerical variation of different fault distances

4.6 对比验证

本文将所提方法的测距结果与现有直流系统常用的行波测距法进行比较。

对于短距离线路的行波测距, 一般采用主动式方法居多, 即单端测距法, 根据传播性质标定一端初始波和反射波, 读取往返时间差达到故障测距目的。

FasTR 法结合了面向动态随机搜索的遗传优化算法, 采样频率设置在 500 kHz。测距结果表明不同位置故障测量结果因频谱影响存在多个高峰, 造

成测距误差。表 5 给出了在线路发生单极接地故障的 3 种不同测距方法的结果对比, 统一设置为金属性接地, 采用 PSCAD 的小波变换器对测量点电流值进行小波变换, 测距结果表明, 采用主动法和 FasTR 法最大误差均大于 2%, 直接时间反转法整体测距结果优于其他两种对比方法。

表 5 方法对比
Table 5 Methods comparison

故障 线路	直接时间反转法 (1000 kHz)		主动式行波测距 (1000 kHz)		FasTR 法 (500 kHz)	
	误差/%		误差/%		误差/%	
	2.6 km	4.3 km	2.6 km	4.3 km	2.6 km	4.3 km
L1	0.962	0.814	1.710	1.832	2.183	2.733
L4	0.192	1.163	1.712	1.222	1.985	2.356
L6	0.192	1.279	1.528	2.231	2.064	2.567

5 结语

本文以两电平 VSC 控制的中压直流配电网为研究对象, 在兼顾突变信号短时性和故障随机性的同时, 基于直接时间反转法实现在直流配电网中的故障测距, 并通过算例分析得到以下结论。

1) 当主馈线故障测距时, 假设故障点在实际故障点处出现电磁能量收敛, 当 T 接线路故障测距时, 分支节点处能量值最大, 分支线路发生故障等同于分支节点发生故障。

2) 过渡电阻的变化以及故障类型, 仅对时间反转测距在故障点处的能量收敛值大小有影响, 能量的最大幅值取决于接地电阻和边界元件的数值。该方法能够在短时窗内充分提取有效信息, 避免谐波干扰, 满足测距精度要求, 不同工况下具有准确性和适用性。

参考文献

[1] 肖友强, 林晓煌, 文云峰. 直流和新能源高渗透型电网惯性水平多维度评估[J]. 电力建设, 2020, 41(5): 19-27.
XIAO Youqiang, LIN Xiaohuang, WEN Yunfeng. Multi-dimensional assessment of the inertia level of power systems with high penetration of HVDCs and renewables[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(5): 19-27.

[2] 王卫, 宫成, 曹文远, 等. 交直流配电网交流侧非对称故障情况下直流侧电压波动特性分析与控制[J]. 电力建设, 2021, 42(11): 90-99.
WANG Wei, GONG Cheng, CAO Wenyuan, et al. Analysis and control of DC side voltage fluctuation characteristics under unbalanced fault of AC side in AC/DC distribution network[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(11): 90-99.

- [3] 芮松华, 刘海璇, 王洪波, 等. 基于遗传-蚁群算法的交直流配电网分布式电源优化配置[J]. 电力建设, 2019, 40(4): 9-17.
RUI Songhua, LIU Haixuan, WANG Hongbo, et al. DG planning method for AC/DC distribution network using genetic-ant colony algorithm[J]. Electric Power Construction, 2019, 40(4): 9-17.
- [4] 赵政嘉, 李海波, 赵宇明, 等. 多类型分布式电源接入下的低压交流与直流配电网运行经济性对比[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(12): 50-61.
ZHAO Zhengjia, LI Haibo, ZHAO Yuming, et al. Operational economic comparison of low voltage AC and DC distribution networks with multi-type distributed generation integration[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(12): 50-61.
- [5] 薛艳静, 徐岩, 程姝. 基于电流变化的环状直流配电网故障定位方法[J]. 智慧电力, 2021, 49(2): 76-82, 98.
XUE Yanjing, XU Yan, CHENG Shu. Fault location method of ring dc distribution network based current variation[J]. Smart Power, 2021, 49(2): 76-82, 98.
- [6] 高闰国, 匡洪海, 周宇健, 等. 直流配电网电压控制策略研究综述[J]. 供用电, 2020, 37(8): 54-59, 75.
GAO Runguo, KUANG Honghai, ZHOU Yujian, et al. An overview of research on voltage control strategies of DC distribution network[J]. Distribution & Utilization, 2020, 37(8): 54-59, 75.
- [7] 童晓阳, 杨明杰, 张广骁. 基于改进 DTW 的行波波相相似性的高压直流输电线路保护方案[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(12): 174-184.
TONG Xiaoyang, YANG Mingjie, ZHANG Guangxiao. A protection scheme for HVDC transmission line based on traveling waveform similarity using improved DTW algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(12): 174-184.
- [8] 田斌, 方覃绍阳, 李振兴, 等. 基于波速修正的多回输电线路行波测距算法[J]. 高压电器, 2019, 55(1): 184-189.
TIAN Bin, FANG Qinshaoyang, LI Zhenxing, et al. Parallel multiloop transmission line travelling wave location algorithm based on amending wave velocity[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(1): 184-189.
- [9] 段宽, 樊艳芳, 王永进, 等. 基于波速补偿故障距离逐步逼近的直流线路行波测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(11): 70-78.
DUAN Kuan, FAN Yanfang, WANG Yongjin, et al. A traveling wave ranging method for a DC line based on wave velocity compensation and fault distance approaching its real value gradually[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(11): 70-78.
- [10] 黄鸣宇, 祁升龙, 芦翔, 等. 基于轨迹去伪的输电线路故障定位方法[J/OL]. 电测与仪表: 1-5[2020-08-18]. DOI: 10.19753/j.issn1001-1390.2022.07.012.
HUANG Mingyu, QI Shenglong, LU Xiang, et al. A novel trajectory purification based fault location method for transmission line[J/OL]. Electrical Measurement & Instrumentation: 1-5[2020-08-18]. DOI: 10.19753/j.issn1001-1390.2022.07.012.
- [11] 付华, 刘公权, 邢亮. 基于同步挤压小波变换的故障行波测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(2): 18-24.
FU Hua, LIU Gongquan, XING Liang. Fault traveling wave ranging method based on synchrosqueezing wavelet transform[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(2): 18-24.
- [12] 杨亚超, 黄纯, 汪星耀, 等. 一种直流配电网线路故障测距新方法[J]. 电网技术, 2019, 43(5): 1787-1794.
YANG Yachao, HUANG Chun, WANG Xingyao, et al. A novel line fault location method for DC distribution network[J]. Power System Technology, 2019, 43(5): 1787-1794.
- [13] 张怿宁, 郝洪民, 李京, 等. 脉冲注入法和单端故障行波法相结合的直流输电系统接地极线路故障测距[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(20): 117-122.
ZHANG Yining, HAO Hongmin, LI Jing, et al. Location of HVDC grounding electrode lines based on combination of pulse injection method and single-ended fault travelling wave method[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(20): 117-122.
- [14] 蒋原, 李擎, 冯茜, 等. 基于 BP 神经网络的直流电网故障定位与保护方法[J]. 高压电器, 2020, 56(8): 23-28.
JIANG Yuan, LI Qing, FENG Qian, et al. Fault location and protection method for DC power grid based on BP neural network[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(8): 23-28.
- [15] 姚永峰, 王启哲, 王慧萍, 等. 基于邻接矩阵的低压配电网故障区段定位方法[J]. 中国电力, 2021, 54(11): 91-96, 114.
YAO Yongfeng, WANG Qizhe, WANG Huiping, et al. Faulted line segment location method for low-voltage distribution network based on adjacency matrix[J]. Electric Power, 2021, 54(11): 91-96, 114.
- [16] YANG Y, HUANG C. DC fault location in multi-terminal DC distribution network based on voltage similar triangle principle[J]. Electric Power Systems Research, 2020, 184.
- [17] DASHTDAR M, ESMAEILBEIG M, NAJAFI M, et al.

- Fault location in the transmission network using artificial neural network[J]. *Automatic Control and Computer Sciences*, 2020, 54(1): 39-51.
- [18] BUCHER M K, FRANCK C M. Analytic approximation of fault current contributions from capacitive components in HVDC cable networks[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2015, 30(1): 74-81.
- [19] HE S, COZZA A, XIE Y Z. On the spatial resolution of fault location techniques based on full fault transients[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2020, 35(3): 1527-1540.
- [20] COZZA A. Time-reversal imaging techniques for soft-fault detection in cable networks[C] // 2018 IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility & Signal and Power Integrity (EMC, SI & PI), July 30 - August 3, 2018, Long Beach, CA, USA.
- [21] 商立群, 呼延海, 黄若轩, 等. 基于电磁时间反转的串补线路故障测距[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(20): 6603-6609.
SHANG Liqun, HU Yanhai, HUANG Ruoxuan, et al. EMTR theory-based fault location for series compensated transmission line[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(20): 6603-6609.
- [22] KAFAL M, NICOLAS G, BENOIT J, et al. Pilot tests of FasTR method for locating transient faults in medium voltage underground power networks[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 21(6): 8510-8519.
- [23] ZENG Y, ZOU G, WEI X, et al. A novel protection and location scheme for pole-to-pole fault in MMC-MVDC distribution grid[J]. *Energies*, 2018, 11(8): 1-17.
- [24] LIANG J C, CHEN Z D, WANG J F, et al. Time-reversal reconstructions of clustered sources and diagnosis of faulty antenna elements in three dimensions[C] // 2019 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium-IMS 2019, June 2-7, 2019, Boston, MA, USA.
- [25] 陶彩霞, 杜雪, 高锋阳, 等. 基于经验小波变换的混合输电线路单相接地故障测距[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(10): 105-112.
TAO Caixia, DU Xue, GAO Fengyang, et al. Single-phase to ground fault location of hybrid transmission lines based on empirical wavelet transform[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(10): 105-112.
- [26] 尚学军, 霍现旭, 郑晓冬, 等. 基于离散小波分析与 K-means 聚类算法的 MMC-HVDC 输电线路保护方案[J]. *电测与仪表*, 2020, 57(24): 52-57.
SHANG Xuejun, HUO Xianxu, ZHENG Xiaodong, et al. MMC-HVDC transmission line protection scheme based on discrete wavelet analysis and k-means clustering algorithm[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2020, 57(24): 52-57.
- [27] 张林, 赖向平, 仲书勇, 等. 基于正交小波和长短期记忆神经网络的用电负荷预测方法[J/OL]. *现代电力*: 1-8[2021-09-12]. DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0070.
ZHANG Lin, LAI Xiangping, ZHONG Shuyong, et al. Electricity load forecasting method based on orthogonal wavelet and long short-term memory neural networks[J/OL]. *Modern Electric Power*: 1-8[2021-09-12]. DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0070.
- [28] 唐西胜. GB/T 35727—2017《中低压直流配电电压导则》解读[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(1): 23-28.
TANG Xisheng. Interpretation of GB/T 35727—2017 guideline for standard voltages of medium and low voltage DC distribution system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(1): 23-28.

收稿日期: 2021-09-30; 修回日期: 2021-11-24

作者简介:

杨欢红(1965—), 女, 硕士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为电力系统优化调度与控制、可再生能源发电技术; E-mail: yanghuanhong0907@163.com

朱子叶(1996—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为直流配电网故障定位; E-mail: 718111565@qq.com

黄文焘(1989—), 男, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要研究方向为配电网、微电网和分布式新能源控制与保护。E-mail: hwt8989@sjtu.edu.cn

(编辑 姜新丽)